

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОУ ВПО «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра сопротивления материалов и теоретической механики

М.А. Карапетян
И.И. Шомин

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ

Методические указания
по дисциплине «Основы архитектуры и строительные конструкции»
для студентов очной и заочной форм обучения
по направлению 270200 «Транспортное строительство»
специальности 270205 «Автомобильные дороги и аэродромы»

Екатеринбург
2010

Печатается по рекомендации методической комиссии ЛИФ.
Протокол № 80 от 08 октября 2009 г.

Рецензент — кандидат технических наук доцент кафедры Т и ДС
Н.А. Гриневич.

Редактор Е.А. Назаренко
Оператор Г.И. Романова

Подписано в печать 15.06.10		Поз. 101
Плоская печать	Формат 60x84 1/16	Тираж 100 экз.
Заказ №	Печ. л. 2,56	Цена 12 руб. 96 коп.

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ
Отдел оперативной полиграфии УГЛТУ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современный инженер, занимающийся проектированием, возведением и эксплуатацией строительных конструкций, должен иметь глубокие знания о теплотехнических и влажностных процессах, протекающих в ограждающих конструкциях зданий. Экономия энергетических ресурсов, долговечность ограждений и их несущая способность зависит, прежде всего от этих процессов.

В последние годы в связи с большими изменениями СНиП П-3-79**. Строительная теплотехника, направленными на экономию энергетических ресурсов, ощущается нехватка технической литературы для практических расчетов температурно-влажностного режима ограждающих конструкций. Не достаточно литературы для обучения студентов строительным дисциплинам в высших учебных заведениях. Мы надеемся, что данное методическое указание восполнит этот пробел.

Опыт преподавания курса «Основы архитектуры и строительных конструкций» в Уральском государственном Лесотехническом университете показал, что студенты с трудом осваивают новые термины, поэтому они выделены жирным курсивом и дано их толкование.

В учебном пособии содержится большое количество справочных материалов, которые необходимы для расчетов и снижают затраты времени на их проведение.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с непрерывным ростом стоимости тепловой энергии возникла острая необходимость в ее экономии. Поэтому Министерство строительства Российской Федерации 11.08.95 г. приняло постановление № 18-81 «Об изменении» № 3, а 19.01.98 г. Государственный комитет Российской Федерации по жилищной и строительной практике принял постановление № 18-8 об изменении № 4 СНиП П-3-79**. Строительная теплотехника. Оба постановления направлены на существенное повышение теплотехнических свойств всех видов ограждающих конструкций зданий.

Новая редакция СНиП [1] с учетом изменений № 3 и № 4 предусматривает увеличение теплотехнических свойств стен и покрытий строящихся с 1 января 2000 г. зданий в 3 ... 3,5, а светопрозрачных конструкций – в 1,1 ... 1,2 раза.

При проектировании этими нормами рекомендуется пользоваться уже с 1998 г.

Кроме того, с 1 января 1998 г. запрещается прием в эксплуатацию объектов без установки приборов учета, контроля и регулирования тепла, горячей и холодной воды и газа.

Повышению теплотехнических свойств ограждений зданий способствует не только увеличение стоимости тепловой энергии, но и появление новых полимерных и минераловатных эффективных утеплителей, позволяющих в ряде случаев существенно увеличить теплотехнические свойства ограждений без увеличения их стоимости.

Немаловажным фактором, стимулирующим повышение теплотехнических свойств, является также и то, что оно ведет к повышению комфортности помещений. Комфортность условий пребывания человека в помещении зависит не только от температуры воздуха в нем, но и от разницы температуры воздуха и температуры внутренней поверхности ограждения. При большом перепаде температур человек чувствует дискомфорт, так как начинает излучением интенсивно отдавать тепло холодному ограждению.

В прежних нормах величина температурного перепада между внутренним воздухом и внутренней поверхностью ограждения составляла для массивных стен жилых зданий 6 °С, а для покрытий и чердачных перекрытий 4 °С. После введения в силу Изменения № 3 СНиП. Строительная теплотехника величина t^H соответственно уменьшена до 4 и 3 °С.

Следует отметить также, что уменьшение затрат энергии на отопление зданий сокращает количество сжигаемого угля, газа и мазута. Таким образом, одновременно решаются многие экологические проблемы.

1. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

1.1. Основные положения расчёта

В соответствии со СНиП II-3-79**. Строительная теплотехника [1] *сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций* R_0 должно быть не менее требуемого сопротивления теплопередаче R_0 , определяемого из санитарно-гигиенических и комфортных условий, а также приведенного сопротивления теплопередаче $R^{эс}$ принимаемого из условия энергосбережения.

Это требование может быть записано в виде

$$\begin{aligned} R_0 &\geq R_0^{TP} \\ R_0 &\geq R_0^{эс}, \end{aligned} \quad (1)$$

Санитарно-гигиенические и комфортные условия оцениваются тремя факторами: температурой внутреннего воздуха t_B , температурой внутренней поверхности ограждений t_B и величиной относительной влажности внутреннего воздуха ϕ_B . При большой разнице между t_B и t возможно образование конденсата на внутренней поверхности ограждения, а также интенсивная отдача тепла человеческим организмом в окружающее пространство. Поэтому разница между этими температурами Δt должна быть меньше нормируемой величины Δt_n по СНиП II-3-79**.

Приведенное сопротивление теплопередаче ограждения из условия энергосбережения $R_0^{\text{эс}}$ принимается по таблицам СНиП II-3-79** в зависимости от назначения здания, вида ограждения и градусо-суток отопительного периода.

Есть отступления от этого правила для зданий:

- с влажным или мокрым режимом и избытками явного тепла более 23 Вт/м^3 ; предназначенных для сезонной эксплуатации (осенью или весной);
- с расчетной температурой внутреннего воздуха 12°C и ниже.

Приведенное сопротивление теплопередаче ограждения этих зданий принимается не ниже значения $R_0^{\text{тр}}$.

При расчете теплотехнических свойств внутренних стен, перегородок и перекрытий между помещениями при разности температур воздуха в этих помещениях более 6°C сопротивление теплопередаче ограждения также принимается не менее $R_0^{\text{тр}}$.

Сопротивление теплопередаче дверей (кроме балконных) и ворот должно быть не менее $0,6 R_0^{\text{тр}}$ стен здания.

Теплотехнические свойства глухой части балконных дверей принимаются в 1,5 раза выше теплотехнических свойств светопрозрачной части этих изделий.

Сопротивления теплопередаче окон, остекленной части балконных дверей, фонарей принимается в соответствии со СНиП II-3-79** [1] с изменением № 4.

1.2. Сопротивление теплопередаче ограждения

Тепловой поток, проходя через ограждение, встречает на своем пути сопротивление, и температура в толще ограждения начинает понижаться. Направление теплового потока и характер изменения температуры в *однородном* ограждении показаны на рис. 1.

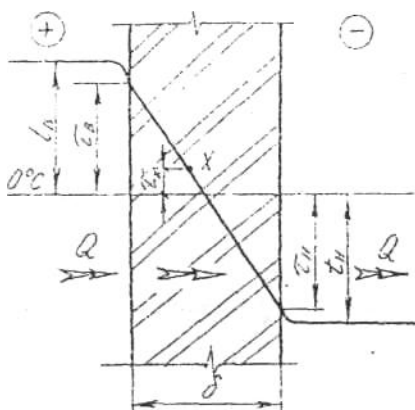


Рис.1. Направление теплового потока и характер распределения температур в однородном ограждении

При стационарных условиях, т.е. при устоявшемся тепловом потоке, количество тепловой энергии, проходящей через ограждение, Вт/ч , равно:

$$Q = (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \frac{\lambda}{\delta} F Z, \quad (2)$$

где λ - коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м °С);

F - площадь ограждения, м²;

Z - время, час.

Остальные обозначения приведены на рис. 1

Пользуясь формулой (2), можем получить выражение для λ Вт/(м °С):

$$\lambda = \frac{Q\delta}{(\tau_{в} - \tau_{н})FZ}. \quad (3)$$

Если принять толщину ограждения $\delta = 1$ м, величину температурного перепада между внутренней и наружной поверхностью ограждения $\tau_{в} - \tau_{н} = 1$ °С, площадь $F = 1$ м², а $Z = 1$ ч, то $\lambda = Q$. Таким образом, можно сделать вывод о том, что **коэффициент теплопроводности материала** равен количеству тепла в Вт/ч, проходящего за 1 ч через ограждение толщиной 1 м, площадью 1 м² при разнице температур, равной 1 °С.

Величина коэффициента зависит от физических свойств, плотности, температуры и влажности материала. Пористые материалы обладают более низкими коэффициентами теплопроводности. Так, например, пенопласты имеют коэффициент теплопроводности в пределах 0,03-0,05; дерево (сосна) 0,14; бетон 1,7 Вт/(м °С).

Одновременно можно привести примеры, когда материалы в силу своих физических свойств при меньшей плотности имеют более высокие коэффициенты теплопроводности. Например, у алюминия коэффициент теплопроводности равен 221 Вт/(м °С), а у стали, имеющей плотность в 3 раза большую, он равен 58 Вт/(м °С). Медь с плотностью несколько большей, чем у стали, имеет коэффициент теплопроводности 407 Вт/(м °С).

Коэффициент теплопроводности воды в 20 раз выше, чем воздуха. Поэтому заполнение пор влагой чревато повышением коэффициента теплопроводности материала и снижением теплотехнических свойств ограждения.

Увлажнение материала может происходить под воздействием влаги, находящейся как в наружном воздухе, так и в воздухе помещения. В наших нормах влияние наружной влаги учитывается через **зону влажности района строительства**, а внутренней воздух помещения – через **влажностный режим помещения** (табл. 1).

Таблица 1

Влажностный режим помещения

Режим	Влажность внутреннего воздуха, %, при температуре		
	До 12°С	Св. 12 до 24°С	Св. 24°С
Сухой	До 60	До 50	До 40
Нормальный	Св. 60 до 75	Св. 50 до 60	Св. 50 до 60
Влажный	Св. 75	Св. 60 до 75	Св. 50 до 60
Мокрый	-	Св. 75	Св. 60

В зависимости от сочетания зоны влажности (сухая, нормальная или влажная) и влажностного режима помещения (сухой, нормальный, влажный или мокрый) по табл. 2 находим условия эксплуатации А или Б.

Таблица 2

Условия эксплуатации ограждающих конструкций в зависимости от влажностного режима помещений и зон влажности

Влажностный режим	Условия эксплуатации А и Б в зонах		
	Сухие	Нормальные	Влажные
Сухой	А	А	Б
Нормальный	А	Б	Б
Влажный или мокрый	Б	Б	Б

Далее по прил. 1 в зависимости от условий эксплуатации А или Б находим коэффициент теплопроводности для конкретного материала. Разница между коэффициентами теплопроводности материалов в зависимости от условий эксплуатации А или Б может достигать 30 %.

Другим фактором, влияющим на коэффициент теплопроводности, является изменение температуры, которое сказывается особенно на пористых материалах типа пенопластов (табл. 3)

Таблица 3

Влияние температуры на коэффициент теплопроводности пенопластов

Марка пенопласта	Плотность, кг/м ³	Соотношение величин λ , %, при температуре, °С			
		-60	0	+20	+60
Полистирольный, ПСБ-С	25...40	63	87	100	-
Фенольный, ФРП-1	60...80	54	83	100	111

В СНиПе II-3-79**. Строительная теплотехника влияние температуры на коэффициент теплопроводности материала не учитывается.

Теплозащитные свойства ограждения характеризуются **сопротивлением теплопередаче** R_0 , которое складывается из трех величин:

$$R_0 = R_{\text{в}} + R + R_{\text{н}}. \quad (4)$$

Первая величина ($R_{\text{в}}$) – сопротивление тепловосприятию – вызвана наличием сопротивления при переходе теплового потока к внутренней поверхности ограждения. Передача тепла ограждению происходит конвекцией и излучением и поэтому зависит от скорости движения воздуха в помещении, от состояния поверхности и физических свойств материала ограждения. В СНиП [1] приведены величины не $R_{\text{в}}$, а величины обратные $R_{\text{в}}$, которые называются **коэффициентом теплоотдачи внутренней поверхности** $\alpha_{\text{в}}$:

$$\alpha_B = \frac{1}{R_B}, \quad (5)$$

Величины α_B , определяемые по табл. 4, сильно усреднены и не учитывают некоторые перечисленные факторы.

Величина R_B является причиной возникновения температурного перепада ($t_B - \tau_B$) (см. рис. 1).

Таблица 4

Коэффициенты теплопередачи на внутренней поверхности α_B

Внутренняя поверхность ограждающих конструкций	Величина коэффициента α_B , Вт/(м ² °С)
1. Стен, полов, гладких потолков, потолков с выступающими ребрами при отношении высоты h ребер к расстоянию a между гранями соседних ребер $h/a \leq 0,3$	8,7
2. Потолков с выступающими ребрами при отношении $h/a > 0,3$	7,6
3. Зенитных фонарей	9,9

Примечание. Коэффициент теплоотдачи α_B ограждающих конструкций животноводческих и птицеводческих зданий принимают в соответствии со СНиП 2.10.03.84.

Вторая величина (R) – термическое сопротивление ограждения – является причиной возникновения температурного перепада ($\tau_B - \tau_H$).

Термическое сопротивление однослойного ограждения определяется по формуле

$$R = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (6)$$

а многослойного – по формуле

$$R = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (7)$$

где $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_i$ – толщины слоев ограждения, м;

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i$ – коэффициенты теплопроводности слоев ограждения, Вт/(м °С), принимаемые из прил. 1

Если в ограждении есть неветилируемые воздушные прослойки, то их термическое сопротивление следует суммировать с термическими сопротивлениями всех остальных слоев ограждения. Величина термического сопротивления замкнутой воздушной прослойки зависит от ее толщины, положения в пространстве и температуры воздуха в ней и определяется по данным, указанным в табл. 5.

Таблица 5

Термическое сопротивление замкнутых воздушных прослоек

Толщина воздушной прослойки, м	Термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки $R_{вп}, \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$			
	Горизонтальной при потоке тепла снизу вверх и вертикальной		Горизонтальной при потоке тепла сверху вниз	
	При температуре воздуха в прослойке			
	Положи- тельной	Отрица- тельной	Положи- тельной	Отрица- тельной
0,01	0,13	0,15	0,14	0,15
0,02	0,14	0,15	0,15	0,19
0,03	0,14	0,16	0,16	0,21
0,05	0,14	0,17	0,17	0,22
0,1	0,15	0,18	0,18	0,23
0,15	0,15	0,18	0,19	0,24
0,2-0,3	0,15	0,19	0,19	0,24

Примечание. При оклейке одной или обеих поверхностей воздушной прослойки алюминиевой фольгой термическое сопротивление следует увеличить в 2 раза.

Как следует из таблицы, термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки при толщине более 15 см меняется незначительно. При большой высоте замкнутой воздушной прослойки из-за разницы температур в нижней и верхней части увеличивается конвекция воздуха, и эффективность воздушной прослойки падает. Поэтому в наружных стенах зданий с сухим и нормальным режимом помещений допускаются замкнутые воздушные прослойки и каналы не выше высоты этажа и не выше 6 м [1].

Вентилируемые воздушные прослойки и слои конструкции, расположенные между ней и наружной поверхностью ограждения, при вычислении термического сопротивления ограждения не учитываются.

Третья величина R_H - сопротивление теплоотдаче на наружной поверхности – вызвано теми же факторами, что и R_B , и является причиной температурного перепада ($t_n - t_H$). В СНиП [1] R_H так же, как и R_g , представлено в виде величины, обратной **коэффициенту теплоотдачи на наружной поверхности ограждения α_n**

$$R_H = \frac{1}{\alpha_n}, \quad (8)$$

Значения величины α_n приведены в табл. 6

Таблица 6

Коэффициенты теплоотдачи α_n для зимних условий

Наружная поверхность ограждающих конструкций	Величина α_n , Вт/(м ² °С)
1. Наружных стен, покрытий, перекрытий над проездами и над холодными (без ограждающих стенок) подпольями в Северной строительной-климатической зоне	23
2. Перекрытий над холодными подвалами, сообщающимися с наружным воздухом, перекрытий над холодными (с ограждающими стенками) подпольями и холодными этажами в Северной строительной зоне	17
3. Перекрытий чердачных и над неотапливаемыми подвалами, со световыми проемами в стенах, а также наружных стен с воздушной прослойкой, вентилируемой наружным воздухом	12
4. Перекрытий над неотапливаемыми подвалами без световых проемов в стенах, расположенных выше уровня земли, и над неотапливаемыми техническими подпольями ниже уровня земли	6

ПРИМЕР 1. Теплотехнический расчет ограждающей конструкции (наружной стены). Район строительства – город Екатеринбург. Зимняя наружная температура равна -36 °С. Строительные материалы представлены на рис. 2.

1. Требуемое сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций (за исключением светопрозрачных), отвечающих санитарно-гигиеническим и комфортным условиям, определяют по формуле

$$R_o^{тп} = \frac{n(t_b - t_n)}{\Delta t^n \alpha_b}, \quad (1)$$

где n - коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху;

t_b - расчетная температура внутреннего воздуха, °С, принимаемая согласно ГОСТ 12.1.005-88 и нормам проектирования соответствующих зданий и сооружений (+16 °С);

t_n - расчетная зимняя температура наружного воздуха (-36 °С);

Δt^n - нормативный температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции (+7 °С);

α_v - коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций ($8,7 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$).

$$R_o^{\text{тр}} = 0,854 \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$$

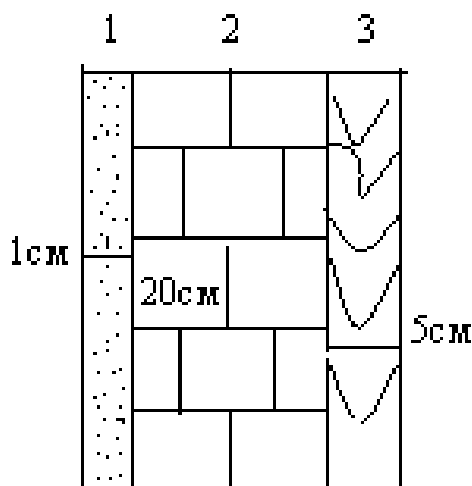


Рис. 2. Строительные материалы к ограждающей стене:

1. №73 известняк песчаный;
2. №85 кирпич;
3. №119 деревянные плиты.

Определяем теплопроводность и теплоусвоение каждого слоя.

$$\text{№73 : } S_1 = 8,69 \text{ Вт/ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \lambda_1 = 0,7 \text{ Вт/ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\text{№85 : } S_2 = 8,64 \text{ Вт/ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \lambda_2 = 0,64 \text{ Вт/ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\text{№119 : } S_3 = 3,93 \text{ Вт/ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \lambda_3 = 0,13 \text{ Вт/ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Зона влажности: 3 (сухая)

2. Тепловую инерцию D ограждающей конструкции следует определять по формуле

$$D = R_1 s_1 + R_2 s_2 + \dots + R_n s_n, \quad (2)$$

где R_1, R_2, \dots, R_n - термические сопротивления отдельных слоев ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$, определяемые по формуле (3);

s_1, s_2, \dots, s_n - расчетные коэффициенты теплоусвоения материала отдельных слоев ограждающей конструкции, $\text{Вт/(м}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$.

Примечание: Расчетный коэффициент теплоусвоения воздушных прослоек принимается равным нулю.

$$D = 0,014 \cdot 8,69 + 0,31 \cdot 8,64 + 0,38 \cdot 3,93 = 4,28.$$

Конструкция средней массивности.

3. Термическое сопротивление R , $\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$, слоя многослойной ограждающей конструкции, а также однородной (однослойной) ограждающей конструкции следует определять по формуле

$$R = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (3)$$

где δ - толщина слоя, м;

λ - расчетный коэффициент теплопроводности материала слоя, Вт/(м °С).

$$R_1 = 0,014 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}; R_2 = 0,31 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}; R_3 = 0,38 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}.$$

Термическое сопротивление R_k , $\text{м}^2 \text{ °С/Вт}$, ограждающей конструкции с последовательно расположенными однородными слоями следует определять как сумму термических сопротивлений отдельных слоев:

$$R_k = 0,704 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}.$$

4. Сопротивление теплопередаче R_o , $\text{м}^2 \text{ °С/Вт}$, ограждающей конструкции следует определять по формуле

$$R_o = \frac{1}{\alpha_v} + R_k + \frac{1}{\alpha_n}, \quad (4)$$

где α_v - то же, что в формуле (1);

R_k - термическое сопротивление ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \text{ °С/Вт}$, определяемое однослойной (однородной) - по формуле (3), многослойной - в соответствии с пп. 2.7 и 2.8;

α_n - коэффициент теплоотдачи (для зимних условий) наружной поверхности ограждающей конструкции, ($23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ °С})$).

$$R_o = 0,11 + 0,704 + 0,043 = 0,857 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}.$$

Вывод: $R_o \approx R_o^{\text{тр}}$ расчет выполнен верно, правильно подобран строительный материал и его толщина; конструкция удовлетворяет требованиям эксплуатации.

1.3. Требуемое сопротивление теплопередаче

Выше, в разделе 1.1., отмечалось, что ограждение здания должно удовлетворять санитарно-гигиеническим и комфортным требованиям. Сопротивление теплопередаче ограждения, удовлетворяющее этим требованиям, называется **требуемым сопротивлением тепло-передаче** и обозначается $R_o^{\text{тр}}$. Сопротивление $R_o^{\text{тр}}$ является минимально допустимым для ограждения. Формула для его вычисления может быть получена следующим образом. Полный температурный перепад ($t_g - t_n$) вызывается сопротивлением теплопередаче ограждения R_o . Поэтому, приняв в формуле (2) $Z = 1$ ч, $F_1 = 1 \text{ м}^2$, записываем выражение для теплового потока в виде

$$Q_1 = \frac{t_g - t_n}{R_o}. \quad (8)$$

При установившемся температурном режиме ограждения такой же тепловой поток проходит в зоне температурного перепада ($t_g - t_{\text{в}}$)

$$Q_2 = \frac{t_g - t_{\text{в}}}{R_g};$$

$$Q_1 = Q_2;$$

$$\frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_0} = \frac{t_{\text{в}} - \tau_{\text{в}}}{R_{\text{в}}}$$

Отсюда

$$R_0 = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{t_{\text{в}} - \tau_{\text{в}}} R_{\text{в}}. \quad (9)$$

Разница между температурами внутреннего воздуха и внутренней поверхности ограждения, обозначенная ранее Δt , характеризует санитарно-гигиенические и комфортные требования, предъявляемые к ограждению. Поэтому эта величина нормируется в СНиП [1]. Она приведена в табл. 7.

Обозначения, принятые в табл. 7.

- $t_{\text{в}}$ - то же, что в формуле (1);
- $t_{\text{р}}$ - температура точки росы, °С, при расчетной температуре и относительной влажности внутреннего, воздуха, принимаемым по ГОСТ 12.1. 005-88, СНиП 2.04.05-91 и нормам проектирования соответствующих зданий и сооружений.

Таким образом, используя нормируемое значение $\Delta t_{\text{н}}$, по формуле (9) можно вычислить требуемое сопротивление теплопередаче

Таблица 7

Нормируемый температурный перепад $\Delta t_{\text{н}}$

Здания и помещения	Величина $\Delta t_{\text{н}}$, °С		
	Для наружных стен	Для покрытий и чердачных покрытий	Для перекрытий над проездами, подвалами и подпольями
1. Жилые, лечебно-профилактические и детские учреждения, школы, интернаты	4,0	3,0	2,0
2. Общественные здания, кроме указанных в п. 1, административные и бытовые, за исключением помещений с влажным и мокрым режимом	4,5	4,0	2,5
3. Производственные здания с сухим и нормальным режимами	—	—	2,5
4. Производственные и другие помещения с влажным или мокрым режимом	—	—	2,5
5. Производственные здания со значительными избытками явного тепла (более 23 Вт/м ³)	12	12	2,5

Ограждение ($R_0^{\text{тп}}$) исключает возникновение конденсата на внутренней поверхности ограждения и обеспечивает комфортные условия.

В СНиП [1] формула (9) преобразована к виду

$$R_0^{\text{TP}} = \frac{n(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})}{\Delta t_{\text{в}} \alpha_{\text{в}}}. \quad (10)$$

В эту формулу введен коэффициент n , который снижает величину температурного перепада $t_{\text{в}} - t_{\text{н}}$ при конкретном положении наружной поверхности ограждающей конструкции по отношению к наружному воздуху. Он равен:

1 – для наружных стен, покрытий и чердачных перекрытий с кровлей из штучных материалов и перекрытий над проездами;

0,9 – для перекрытий над холодными подвалами и чердачных перекрытий с кровлей из рулонных материалов;

0,75 – для перекрытий над неотапливаемыми подвалами со световыми проемами в стенах;

0,6 – для перекрытий над неотапливаемыми подвалами без световых проемов в стенах.

Расчетная температура внутреннего воздуха $t_{\text{в}}$ принимается по ГОСТ 12.1.005-88 [3] и нормам проектирования соответствующих зданий и сооружений. Она учитывает санитарно-гигиенические требования, а для промышленных зданий – дополнительные условия, обеспечивающие нормальное протекание технологического процесса.

Расчетная температура внутреннего воздуха принимается:

- в жилых помещениях и комнатах общественных организаций +21 °С;
- то же, но при расчетной температуре наружного воздуха ниже +25°С;
- в ванных комнатах и душевых +12 °С;
- в торговых залах продовольственных магазинов +15 °С;
- в торговых залах магазинов промышленных товаров +15 °С;
- в зрительных залах +15 °С;
- в спортивных залах +15 °С;
- в кабинетах врачей +20 °С;
- в гаражах для хранения автомобилей +5 °С;
- в гаражах для ремонта автомобилей +15 °С;
- в производственных зданиях с незначительными выделениями тепла при категории работы:
 - легкой +21-24 °С;
 - средней тяжести +18-20 °С;
 - тяжелой +16-19 °С.

Категории работ по тяжести, в соответствии с ГОСТ 12.1.005-88, характеризуются следующими видами деятельности:

1) легкие - работы, производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся незначительными или некоторым физическим напряжением (расход энергии не более 174 Вт);

2) средней тяжести - работы, связанные с ходьбой, перемещением тяжести до 10 кг и сопровождающиеся умеренным физическим напряжением (расход энергии в пределах 175-290 Вт);

3) тяжелые - работы, связанные с постоянным передвижением, перемещением и переноской тяжести более 10 кг и требующие больших физических усилий (расход энергии выше 290 Вт).

Расчетная температура наружного воздуха t_n , в соответствии со СНиП 11-3-79**. Строительная теплотехника [1], в отличие от ранее существовавших норм, принимается единой независимо от тепловой инерции ограждений и равной средней температуре холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92. Это означает, что в 92 случаях из 100 температура наружного воздуха не будет ниже указанной средней температуры холодной пятидневки.

Для ряда городов России средние температуры холодной пятидневки приведены в прил. 2. Для других районов России эту температуру следует принимать по СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика.

Для определения величины нормируемого температурного перепада Δt_n по табл. 7 в ряде зданий и помещений необходимо знать **температуру точки росы t_p** . Температура точки росы определяется с помощью табл.8, в которой приведены значения максимальной упругости водяного пара в зависимости от температуры воздуха. Зная температуру воздуха в помещении, по табл. 8 находим максимальную упругость водяного пара **E** . Умножив эту величину на относительную влажность воздуха внутри помещения, поделенную на 100 %, получаем фактическую упругость водяного пара **e** . После этого по той же таблице, приняв упругость водяного пара **e** за максимальную, находим температуру воздуха, которая и будет точкой росы **t_p** .

ПРИМЕР 2. Подобрать толщину утеплителя в ограждающей конструкции перекрытия одноэтажного отапливаемого промышленного здания, возводимого в городе Екатеринбурге. Зимняя наружная температура составляет -36°C .

Состав покрытия:

- 1) железобетонная плита №1;
- 2) пароизоляционный слой № 186;
- 3) теплоизоляционный слой №129;
- 4) выравнивающий слой №17;
- 5) гидроизоляционный слой №180.

Влажностный режим внутри помещения нормальный.

1. Требуемое сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций (за исключением светопрозрачных), отвечающих санитарно-гигиеническим и комфортным условиям, определяют по формуле

$$R_0^{\text{тп}} = \frac{n(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})}{\Delta t^{\text{н}} \alpha_{\text{в}}}, \quad (1)$$

где n - коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху (0,9);

$t_{\text{в}}$ - расчетная температура внутреннего воздуха, °C, принимаемая согласно ГОСТ 12.1.005-88 и нормам проектирования соответствующих зданий и сооружений (+16 °C);

$t_{\text{н}}$ - расчетная зимняя температура наружного воздуха, (-36 °C);

$\Delta t^{\text{н}}$ - нормативный температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции (+4 °C);

$\alpha_{\text{в}}$ - коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций ($\alpha_{\text{в}} = 7,6 \text{ Вт/м}^2 \text{ °C}$);

$$R_0^{\text{тп}} = 1,391 \text{ м}^2 \text{ °C/Вт.}$$

$$n = 0,9; \quad \alpha_{\text{в}} = 7,6.$$

Определяем теплопроводность и теплоусвоение каждого слоя.

$$\text{№1: } S_1 = 17,98 \text{ Вт/м}^2 \text{ °C}; \quad \lambda_1 = 1,92 \text{ Вт/м}^2 \text{ °C};$$

$$\text{№186: } S_2 = 3,53 \text{ Вт/м}^2 \text{ °C}; \quad \lambda_2 = 0,17 \text{ Вт/м}^2 \text{ °C};$$

$$\text{№129: } S_3 = 0,73 \text{ Вт/м}^2 \text{ °C}; \quad \lambda_3 = 0,064 \text{ Вт/м}^2 \text{ °C};$$

$$\text{№17: } S_4 = 10,5 \text{ Вт/м}^2 \text{ °C}; \quad \lambda_4 = 0,8 \text{ Вт/м}^2 \text{ °C};$$

$$\text{№180: } S_5 = 6,8 \text{ Вт/м}^2 \text{ °C}; \quad \lambda_5 = 0,27 \text{ Вт/м}^2 \text{ °C}.$$

Зона влажности: 3 (сухая).

2. Тепловую инерцию D ограждающей конструкции следует определять по формуле

$$D = R_1 s_1 + R_2 s_2 + \dots + R_n s_n, \quad (2)$$

где R_1, R_2, \dots, R_n - термические сопротивления отдельных слоев ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \text{ °C/Вт}$, определяемые по формуле (3);

s_1, s_2, \dots, s_n - расчетные коэффициенты теплоусвоения материала отдельных слоев ограждающей конструкции, $\text{Вт/(м}^2 \text{ °C)}$.

$$D = 1,86 + 0,03 + 0,57 + 1,31 + 0,25 = 4,02$$

Конструкция средней массивности.

3. Термическое сопротивление R , $\text{м}^2 \text{ °C/Вт}$, слоя многослойной ограждающей конструкции, а также однородной (однослойной) ограждающей конструкции следует определять по формуле

$$R = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (3)$$

где δ - толщина слоя, м;

λ - расчетный коэффициент теплопроводности материала слоя, Вт/(м °C) .

$$R_1 = 0,104 \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}; R_2 = 0,009 \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}; R_3 = 0,78 \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}; \\ R_4 = 0,125 \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}; R_5 = 0,037 \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}.$$

Термическое сопротивление R_k , $\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$, ограждающей конструкции с последовательно расположенными однородными слоями следует определять как сумму термических сопротивлений отдельных слоев:

$$R_k = \sum R_i + R_{\text{в.п.}} \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт} \text{ (СНиП прил. 4).} \\ R_k = 1,185 \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$$

4. Сопротивление теплопередаче R_o , $\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$, ограждающей конструкции следует определять по формуле

$$R_o = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + R_k + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}, \quad (4)$$

где $\alpha_{\text{в}}$ - то же, что в формуле (1);

R_k - термическое сопротивление ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$, определяемое: однородной (однослойной) - по формуле (3), многослойной - в соответствии с пп. 2.7 и 2.8;

$\alpha_{\text{н}}$ - коэффициент теплоотдачи (для зимних условий) наружной поверхности ограждающей конструкции, ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$).

$$R_o = 0,13 + 1,185 + 0,8 = 1,395 \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}.$$

Вывод: $R_o \approx R_o^{\text{тр}}$, расчет выполнен верно, правильно подобран строительный материал и его толщина; конструкция удовлетворяет требованиям эксплуатации.

Таблица 8

Значения максимальной упругости водяного пара в зависимости от температуры воздуха t

t	Максимальная упругость водяного пара E (Па)									
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
29	4005	4029	4052	4076	4100	4122	4146	4170	4194	4218
28	3780	3801	3824	3846	3869	3890	3913	3936	3960	3982
27	3565	3586	3608	3628	3649	3672	3693	3714	3736	3758
26	3361	3381	3401	3421	3441	3461	3482	3502	3523	3544
25	3163	3186	3205	3224	3244	3263	3283	3301	3321	3341
24	2984	3001	3020	3038	3056	3074	3093	3112	3130	3149
23	2809	2826	2842	2860	2877	2894	2913	2930	2948	2965
22	2644	2660	2676	2692	2709	2725	2742	2758	2776	2792
21	2486	2502	2517	2533	2548	2564	2580	2596	2612	2628
20	2338	2352	2366	2381	2395	2410	2426	2441	2456	2472
19	2197	2210	2224	2238	2252	2266	2280	2294	2309	2324
18	2064	2076	2089	2102	2116	2129	2142	2156	2169	2182
17	1937	1949	1961	1974	1986	2000	2123	2025	2037	2050
16	1817	1829	1841	1853	1865	1877	1889	1901	1913	1925
15	1705	1716	1727	1739	1749	1760	1772	1783	1796	1806

Окончание табл. 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
14	1598	1608	1613	1629	1640	1651	1661	1672	1683	1694
13	1497	1507	1517	1527	1537	1547	1557	1567	1577	1588
12	1403	1412	1421	1431	1440	1449	1459	1468	1477	1487
11	1312	1321	1330	1339	1348	1357	1366	1375	1384	1393
10	1228	1236	1244	1252	1261	1269	1277	1286	1295	1304
9	1148	1156	1164	1172	1179	1187	1195	1203	1212	1220
8	1072	1080	1087	1095	1102	1109	1117	1125	1132	1140
7	1001	1008	1016	1023	1030	1037	1044	1051	1058	1065
6	935	941	948	955	961	968	975	981	988	995
5	872	879	885	891	897	903	909	916	922	928
4	813	819	825	831	836	842	848	854	860	866
3	757	762	768	774	780	785	791	796	802	808
2	705	710	716	721	727	732	737	742	747	752
1	657	661	666	671	676	681	685	690	695	700
0	611	615	620	624	628	633	637	642	647	652
-1	562	557	553	548	544	538	535	530	525	521
-2	517	513	508	504	500	496	492	488	484	480
-3	476	472	468	464	460	456	452	448	444	440
-4	437	433	429	425	422	419	415	412	408	404
-5	401	397	394	391	388	384	381	378	375	371
-6	368	365	361	358	355	352	349	346	343	340
-7	337	334	332	329	326	323	320	317	314	311
-8	309	307	304	301	299	296	293	291	288	285
-9	283	281	279	276	273	271	269	267	264	262
-10	260	257	255	252	250	248	245	243	241	239
-11	237	235	233	231	229	227	225	223	221	219
-12	217	215	213	211	209	207	205	203	201	199
-13	198	196	195	193	191	189	187	185	184	182
-14	181	179	177	176	175	173	171	169	168	166
-15	165	164	163	161	159	157	156	154	153	152
-16	151	149	148	147	145	144	142	141	140	139
-17	131	136	135	133	132	131	130	129	127	125
-18	124	123	122	121	120	119	117	116	115	114
-19	113	112	111	110	109	108	107	105	104	103
-20	103	—	—	—	—	99	—	—	—	—

2. ПРИВЕДЁННОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ ИЗ УСЛОВИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Как отмечалось в параграфе 1.1, сопротивление теплопередаче ограждения R_o должно быть больше или равно не только требуемому сопротивлению теплопередаче $R_o^{тр}$, но и приведенного сопротивления теплопередаче $R_o^{эс}$ установленного СНиП П-3-79**, исходя из условия энергосбережения.

Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций $R_0^{\text{эс}}$ определяется по табл. 9 в зависимости от градусо-суток отопительного периода (ГСОП), вида ограждения, назначения здания или помещения.

$$\text{ГСОП} = (t_{\text{в}} - t_{\text{от.пер.}}) Z_{\text{от.пер.}}, \quad (11)$$

где $t_{\text{от.пер.}}$ и $Z_{\text{от.пер.}}$ – средняя температура и продолжительность отопительного периода соответственно.

Примечания: 1. Промежуточные значения $R_0^{\text{эс}}$ определять интерполяцией.
2. Нормы сопротивления теплопередаче светопрозрачных ограждающих конструкций для помещений производственных зданий с влажным и мокрым режимами, с избытками явного тепла от 23 Вт/м^2 , а также помещений общественных, административных и бытовых зданий с влажным или мокрым режимами следует принимать как для помещений с сухим или нормальным режимами производственных зданий.

3. Приведенное сопротивление теплопередаче глухой части балконных дверей должно быть не менее, чем в 1,5 раза выше сопротивления теплопередаче светопрозрачной части этих изделий.

4. Конкретное фактическое сопротивление теплопередаче светопрозрачных конструкций не следует принимать меньше, чем на 5 % от требуемого в таблице.

Таблица 9

Приведенное сопротивление теплопередаче
ограждающих конструкций $R_0^{\text{эс}}$

Здания и помещения	Градусо-сутки отопительного периода, °С сут	Величина $R_0^{\text{эс}}$, $\text{м}^2\text{°C/Вт}$				
		Для стен	Для покрытий и перекрытий над проездами	Для перекрытий чердачных, над холодными подпольями и подвалами	Для окон и балконных дверей	Для фонарей
1	2	3	4	5	6	7
Жилые, лечебно-профилактические и детские учреждения, школы, интернаты	2 000	2,1	3,2	2,8	0,30	0,25
	4 000	2,8	4,2	3,7	0,45	0,35
	6 000	3,5	5,2	4,6	0,60	0,40
	8 000	4,2	6,2	5,5	0,70	0,45
	10 000	4,9	7,2	6,4	0,75	0,50
	12 000	5,6	8,2	7,3	0,80	0,55
Общественные, кроме указанных выше, административные и бытовые за исключением помещений с влажным или мокрым режимом	2 000	1,6	2,4	2,0	0,30	0,30
	4 000	2,4	3,2	2,7	0,40	0,35
	6 000	3,0	4,0	3,4	0,50	0,40
	8 000	3,6	4,8	4,1	0,60	0,45
	10 000	4,2	5,6	4,8	0,70	0,50
	12 000	4,8	6,4	5,5	0,80	0,55

1	2	3	4	5	6	7
Производственные с сухим и нормальным режимами	2 000	1,4	2,0	1,4	0,25	0,20
	4 000	1,8	2,5	1,8	0,30	0,25
	6 000	2,2	3,0	2,2	0,35	0,30
	8 000	2,6	3,5	2,6	0,40	0,35
	10 000	3,0	4,0	3,0	0,45	0,40
	12 000	3,4	4,5	3,4	0,50	0,45

ПРИМЕР 3. Определить приведенное сопротивление теплопередаче стенового ограждения производственного здания из условия энергосбережения.

Исходные данные. Принять по примеру 2. Дополнительные данные: средняя температура отопительного периода равна - 9,7>°C, а продолжительность отопительного периода 257 сут. (прил. 2).

Расчет. Определяем градусо-сутки отопительного периода (ГСОП) по формуле (11).

$$\text{ГСОП} = (18 + 9,7) 257 = 7\,119 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{сут.}$$

Путем интерполяции по табл. 9 находим приведенное сопротивление теплопередаче стенового ограждения, которое требуется из условия энергосбережения, $R_0^{\text{эс}} = 2,424 \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Сравнивая $R_0^{\text{эс}}$ с вычисленным в предыдущем примере, можно установить, что $R_0^{\text{эс}}$ в 2,4 раза больше, чем $R_0^{\text{тп}}$.

3. ТОЛЩИНА УТЕПЛИТЕЛЯ

Для определения толщины утеплителя в ограждении следует принять за R_0 максимальную из двух величин $R_0^{\text{тп}}$ и $R_0^{\text{эс}}$.

В этом случае будут удовлетворены как требования экономии энергетических ресурсов, так и требования санитарно-гигиенические и комфортные.

Термическое сопротивление утеплителя может быть получено, если из R_0 вычесть сопротивления теплоперевода на внутренней и наружных поверхностях, а также термические сопротивления всех конструктивных слоев

$$R_{\text{ут}} = R_0 - \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} - \sum R_{\text{кс}} - \frac{1}{\alpha_{\text{с}}}, \quad (12)$$

где $\sum R_{\text{кс}}$ - суммарное термическое сопротивление всех конструктивных слоев (всех слоев, кроме утеплителя), термическое сопротивление каждого слоя определяется по формуле (6).

Определив $R_{\text{ут}}$, находим толщину утеплителя

$$\delta_{\text{ут}} = R_{\text{ут}} \lambda_{\text{ут}} \quad (13)$$

Толщина утеплителя, как правило, округляется в соответствии с требованиями ГОСТ или техническими условиями на него.

Техническое состояние перекрытий существенно зависит от количества и интенсивности воздействий всевозможных неблагоприятных факторов, которые снижают срок эксплуатации. Наиболее распространенной причиной ускоренного износа деревянных конструкций, в том числе и перекрытий, являются их периодическое увлажнение, особенно в сочетании с воздействием знакопеременных температур, которое приводит к образованию и интенсивной жизнедеятельности дереворазрушающих грибов. Кроме того, разрушительными являются воздействия различных газовых выбросов, шумов, вибраций. Поэтому актуальной является задача подбора или создание экологически чистых материалов способных противостоять указанным выше воздействиям. В качестве такого материала может служить, например, КТлайт.

Опыт применения в деревянном домостроении при строительстве перекрытий и возведении стен таких теплоизоляционных материалов, как земля, глина, шлак, керамзит не всегда приводит к требуемым результатам, так как не всегда могут обеспечить требуемое термическое сопротивление R_0^{TP} .

Наиболее экологически чистым и стойким к воздействию теплоизоляционным материалом является, по нашему мнению, КТлайт. Кроме того, этот теплоизоляционный материал гибкий, легкий, удобный в применении, экологически чистый, отвечает требованиям СЭС. Особое значение этого теплоизоляционного материала состоит в том, что он не горюч, экологически чист, экономичен.

Новые теплоизоляционные материалы позволяют применять новые схемы конструкций, т.е. в нежилой зоне здания (крыша) возможна жилая дополнительная площадь.

Из приведенных нами оценок следует, что

$$R_0^{\text{TP}} = \frac{1(22 + 35)}{4 \cdot 8,7} = 1,638 \text{ (м}^2 \text{ °C/Вт)}.$$

КТлайт – новый теплоизоляционный материал.

$$R_0 = \frac{1}{8,7} + 1,661 + \frac{1}{12} = 1,658 \text{ (м}^2 \text{ °C/Вт)}.$$

В целях сокращения потерь тепла в зимний период и поступлений тепла в летний период, учитывая экономическую целесообразность объемов применения ограждающих конструкций, следует предусматривать сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций.

1. Требуемое сопротивление теплопередаче R_0^{TP} , м² °C/Вт, ограждающих конструкций, определяем по формуле

$$R_0^{\text{TP}} = \frac{n(t_B - t_H)}{\Delta t'' \alpha_B}, \quad (1)$$

где n - коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху по табл. 3* (СНиП II-3-79**);

$t_{в}$ - расчётная температура внутреннего воздуха, °С, принимаемая согласно ГОСТ 12.1.005-76 и нормам проектирования соответствующих зданий и сооружений;

$t_{н}$ - расчётная зимняя температура наружного воздуха, °С, равная средней температуре наиболее холодной пятидневки, обеспеченностью 0.92 (СНиП 2.01.01-82);

Δt^H - нормативный температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающих конструкций, принимаемый по табл. 2* (СНиП II-3-79**. Строительная теплотехника);

$\alpha_{в}$ - коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций, принимаемый по табл. 4.

2. Термическое сопротивление R , $m^2 \text{ } ^\circ C / \text{Вт}$ слоя многослойной ограждающей конструкции, а также однородной (однослойной) ограждающей конструкции следует определять по формуле

$$R = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (2)$$

где δ - толщина слоя, м;

λ - расчётный коэффициент теплопроводности материала слоя, $\text{Вт} / \text{м } ^\circ C$, принимаемые по прил. 3* (СНиП II-3-79**);

3. Тепловую инерцию D ограждающей конструкции следует определять по формуле

$$D = R_1 s_1 + R_2 s_2 + \dots + R_n s_n, \quad (3)$$

где R_1, R_2, R_n - термические сопротивления отдельных слоёв ограждающей конструкции, $m^2 \text{ } ^\circ C / \text{Вт}$, определяемые по формуле (3);

s_1, s_2, \dots, s_n - расчётные коэффициенты теплоусвоения материала отдельных слоёв ограждающей конструкции, $\text{Вт} / \text{м}^2 \text{ } ^\circ C$, принимаемые по прил. 3* (СНиП II-3-79**).

4. Термическое сопротивление $R_k = R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{в.п.}$,

где R_1, R_2, \dots, R_n - термические сопротивления отдельных слоёв ограждающей конструкции, $m^2 \text{ } ^\circ C / \text{Вт}$, определяемые по формуле (2);

$R_{в.п.}$ - термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки, принимаемое по прил. 4 с учетом примеч. 2 к п. 2.4* (СНиП II-3-79**).

При определении R_k слои конструкции, расположенные между воздушной прослойкой, вентилируемой наружным воздухом, и наружной поверхностью, ограждающей конструкции, не учитываются.

5. Сопротивление теплопередаче R_0 , $\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, ограждающей конструкции следует определять по формуле

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + R_{\text{к}} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}, \quad (4)$$

где $\alpha_{\text{в}}$ - то же, что в формуле (1);

$R_{\text{к}}$ - термические сопротивление ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, определяемое: однородной (однослойной) – по формуле (3), многослойной – в соответствии с пп. 2.7 и 2.8 (СНиП II-3-79**);

$\alpha_{\text{н}}$ - коэффициент теплоотдачи (для зимних условий) наружной поверхности ограждающей конструкции, $\text{Вт}/\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, принимаемый по табл. 6 (СНиП II-3-79**).

Для покрытий производственных зданий с нормальным режимом

$$\Delta t_{\text{н}} = 6 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad \alpha = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}) \text{ (табл. 4),}$$

получим
$$R_0^{\text{ТР}} = \frac{1,0(18 + 34)}{6 \cdot 8,7} = 0,996 \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

По табл. 9 находим минимальное приведенное сопротивление теплопередаче, исходя из условий энергосбережения. Для этого по формуле (11) определяем градусо-сутки отопительного периода (ГСПО)

$$\text{ГСПО} = (18 + 7,3) 218 = 5515 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{сут.}$$

Интерполяцией находим

$$R_0^{\text{ЭС}} = 2,88 \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

Учитывая, что $R_0^{\text{ЭС}} > R_0^{\text{ТР}}$, для дальнейших расчетов принимаем минимально приведенное сопротивление теплопередаче

$$R_0 = 2,88 \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт.}$$

Термическое сопротивление слоя утеплителя, рассчитанное по формуле (12), равно:

$$R_{\text{ут}} = 2,88 - \frac{1}{8,7} - \frac{0,02}{1,05} - \frac{0,008}{0,17} - \frac{0,0015}{0,17} - \frac{1}{23} = 2,647 \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт.}$$

Толщина утеплителя равна

$$\delta_{\text{ут}} = 2,647 \cdot 0,07 = 0,185 \text{ м.}$$

Учитывая, что, в соответствии с ГОСТ 22950-87, минераловатные плиты повышенной жесткости изготавливаются толщиной 40, 50 и 60 мм, принимаем три слоя толщиной по 50 мм и один слой толщиной 40 мм.

При реконструкции зданий часто возникает вопрос: удовлетворяет ли имеющаяся конструкция ограждения возросшим санитарно-гигиеническим и комфортным требованиям, а также современным условиям экономии энергетических ресурсов? Для этого необходимо определить сопротивление теплопередаче ограждения R_0 и сравнить его с $R_0^{\text{ТР}}$ и $R_0^{\text{ЭС}}$. Если R_0 будет меньше, чем $R_0^{\text{ТР}}$ и $R_0^{\text{ЭС}}$, то ограждение требуется утеплить.

4. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО РАСЧЕТА НЕОДНОРОДНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Выше отмечалось, что к неоднородным ограждениям относятся однослойные или многослойные ограждения с теплопроводными включениями. Такими конструкциями являются каменные стены облегченной кладки, трехслойные с железобетонными наружными и внутренними слоями, металлические панели с эффективными утеплителями и внутренними ребрами и т.п. В связи с возрастающими требованиями к теплотехническим свойствам ограждающих конструкций и включением в них высокоэффективных утеплителей все большее число конструкций становятся неоднородными.

В неоднородном ограждении тепловые потоки искривляются, направляясь в сторону наиболее теплопроводных участков. В этом случае, если теплопроводные включения протяжные, то мы имеем двухмерное температурное поле, а если теплопроводные включения точечные, то – трехмерное. Точный расчет таких конструкций сложен и реален только на ЭВМ [2, 3]. В данной работе приводится приближенный расчет таких конструкций, который нашел отражение в СНиП [1]. В соответствии с этим расчетом теплотехнические свойства неоднородного ограждения приводятся к теплотехническим свойствам однородного. Соответственно, сопротивление теплопередаче такого ограждения называется приведенным ($R_0^{пр}$).

Принципиальное требование о том, что сопротивление теплопередаче ограждения должно быть больше $R_0^{тр}$ и $R_0^{эс}$, сохраняется (см. раздел 1.1.).

Для вычисления $R_0^{пр}$ необходимо:

1) установить размеры всех слоев ограждения и теплопроводных включений. Если ограждение имеет регулярную конструкцию, то следует выделить фрагмент ограждения (рис. 6). На рисунке фрагмент заштрихован;

2) разрезать фрагмент ограждения плоскостями, параллельными направлению теплового потока, на участки, состоящие из одного материала (участок I) или нескольких материалов (участок II) (рис. 6);

3) определить термическое сопротивление ограждения по формуле

$$R_A = \frac{F_1 + F_2 + \dots + F_n}{\frac{F_1}{R_1} + \frac{F_2}{R_2} + \dots + \frac{F_n}{R_n}}, \quad (14)$$

где $F_1, F_2 \dots F_n$ – площади отдельных участков конструкции, m^2 ;

$R_1, R_2 \dots R_n$ – термические сопротивления отдельных участков конструкций.

Термическое сопротивление однородных участков конструкции (участок I), определяется по формуле (6), а многослойных участков (участок II) – по формуле (7).

В этом расчете принималось, что в пределах каждого элемента ограждения тепловой поток строго перпендикулярен поверхности ограждения.

В действительности поток искривляется, и через элементы с меньшими теплотехническими свойствами тепловой поток становится более интенсивным. Поэтому значение R_A завышено. Чтобы это учесть, делается второй расчет.

4) разрезать ограждение плоскостями, перпендикулярными направлению теплового потока на слои, которые могут оказаться однородными (из одного материала) и неоднородными из разных материалов (рис. 6, сеч.3, 4 и 5).

Термическое сопротивление однородных слоев определяют по формуле (6), а неоднородных – по формуле (14). Термическое сопротивление ограждения R_B вычисляют как сумму термических сопротивлений однородных и неоднородных слоев. Величина R_B всегда получается меньше действительной.

5) окончательно приведенное термическое сопротивление ограждающей конструкции следует определять как среднее между R_A и R_B , но, учитывая, что ближе к действительному, СНиП [1], на основе исследований профессора Власова О.Е., рекомендует пользоваться формулой

$$R^{PP} = \frac{R_A + 2R_B}{3}. \quad (15)$$

Приведенное сопротивление теплопередаче ограждения будет равно:

$$R_0^{PP} = \frac{1}{\alpha_n} + R^{PP} + \frac{1}{\alpha_{в}}. \quad (16)$$

Как отмечалось выше, этот метод расчета приближенный и поэтому не применим, если величина R_A отличается от R_B более, чем на 25 % или если ограждение неплоское, т.е. имеет выступы на наружной или внутренней поверхностях. Для этих случаев расчет следует вести с использованием ЭВМ [2, 3]. В результате расчета на ЭВМ получаем температурное поле в пределах всего фрагмента и величину теплового потока, проходящего через него. Зная его, легко найти приведенное сопротивление теплопередаче по формуле

$$R_0^{PP} = \frac{t_b - t_n}{Q} F, \quad (17)$$

где Q - величина теплового потока, проходящего через фрагмент, Вт;

F - площадь фрагмента, м².

Таблица 10

Минимальные значения коэффициента теплотехнической однородности g ограждающих конструкций зданий

Ограждающая конструкция	Коэффициент g
1. Из однослойных легкогобетонных панелей	0,90
2. Из легкогобетонных панелей с термовкладышами	0,75
3. Из трехслойных железобетонных панелей с эффективным утеплителем и гибкими связями	0,70

Ограждающая конструкция	Коэффициент γ
4. Из трехслойных железобетонных панелей с эффективным утеплителем и железобетонными шпонками или ребрами из керамзитобетона	0,60
5. Из трехслойных железобетонных панелей с эффективным утеплителем и железобетонными ребрами	0,50
6. Из трехслойных металлических панелей с эффективным утеплителем	0,75
7. Из трехслойных асбестоцементных панелей с эффективным утеплителем	0,70

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ОГРАЖДЕНИЯ И В ЕГО ТОЛЩЕ

Для решения ряда инженерных задач очень важно знать температуру на внутренней поверхности ограждения и в его толще. Значение температуры на внутренней поверхности ограждения позволяет установить, выпадает ли на ней конденсат и какова фактическая величина температурного перепада Δt между внутренним воздухом и внутренней поверхностью ограждения. В результате можно установить, соответствует ли величина Δt нормируемой величине Δt_n .

Значение температуры в толще ограждения позволяет правильно расположить утеплитель в ограждении и произвести оценку влажностного режима.

При установившемся тепловом режиме формулу для вычисления температуры внутренней поверхности τ_B можно получить из выражения (9)

$$\tau_B = t_B - \frac{t_B - t_n}{R_0} R_B, \quad (18)$$

Если же записать равенство теплового потока, проходящего через ограждение до точки X (см. рис. 1) и через толщу ограждения в целом, включая пограничные слои воздуха, то получим формулу для вычисления температуры τ_x

$$Q_x = \frac{t_B - \tau_x}{R_B + R_x} = \frac{t_B - t_n}{R_0} = Q.$$

Следует

$$\tau_x = t_B - \frac{t_B - t_n}{R_0} (R_B + R_x). \quad (19)$$

При подстановке в формулу (21) вместо R_x термических сопротивлений слоев ограждения нарастающим итогом получим температуры на границе всех слоев ограждения, включая температуру наружной поверхности.

Добавив к ним сопротивление теплоотдаче на наружной поверхности R_n , получим в скобках сопротивление теплопередаче всего ограждения R_0 . Величина τ_x в этом случае будет равна температуре наружного воздуха t_n . Это обстоятельство позволяет произвести проверку правильности вычисления температур по слоям.

Из формулы (20) следует, что при заданных температурах наружного и внутреннего воздуха температура на внутренней поверхности ограждения зависит от сопротивления R_0 и сопротивления тепловосприятию на внутренней поверхности R_v . Следовательно, исключить конденсат на внутренней поверхности ограждения можно двумя путями:

- увеличить R_0 , т.е. дополнительно утеплить ограждения, что не всегда возможно или дорого;

- уменьшить R_v , которое составляет, как правило, не более 3-5 % от R_0 . Уменьшение R_v практически не скажется на величине теплового потока, проходящего через ограждение, но на температуру внутренней поверхности это скажется очень сильно. Поэтому, меняя R_v , можно регулировать температуру внутренней поверхности ограждения. В связи с этим, необходимо изучить, от чего зависит R_v .

Сопротивление тепловосприятию на внутренней поверхности R_v является величиной, обратной коэффициенту тепловосприятия α_v , который равен

$$\alpha_v = \alpha_k + \alpha_l, \quad (21)$$

где α_k, α_l соответственно коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k зависит от скорости движения воздуха около поверхности ограждения, на которую, в свою очередь, влияет разница температур между поверхностью ограждения и окружающим воздухом, а также от наличия препятствий для движения воздуха.

На внутренней поверхности стен, при отсутствии препятствий для движения воздуха, В.Н. Богословским [4] предложено определять α_k по следующей формуле

$$\alpha_k = 1,43 \sqrt[3]{t_s - t_v}. \quad (20)$$

Для потолков рекомендуется численный коэффициент в формуле (21) принимать равным 1,86, а для пола 1,0.

Учитывая, что на поверхность пола воздействует общий конвективный поток воздуха всего помещения, К.Ф. Фокин [5] предлагает для пола принимать величину такую же, как и для вертикальных стен.

На наружной поверхности ограждения теплоотдача происходит в основном за счет обдувания поверхности ветром. Поэтому α_k определяется по эмпирической формуле, предложенной Франком:

$$\alpha_K = 1,16 (6,31\nu^{0,656} + 3,2e^{-1,91\nu}), \quad (22)$$

где ν - скорость ветра в м/с;

e – основание натуральных логарифмов ($e = 2,718$).

За расчетную скорость ветра в зимний период принимается средняя скорость из трех румбов за январь, повторяемость ветра которых составляет 16 % и более. Скорости ветра приведены в СНиП 2.01.01-82 [6]. Для чердачных перекрытий скорость ветра принимается равной 0,5 м/сек.

Чтобы увеличить конвективный теплообмен на внутренней поверхности ограждения и таким образом повысить ее температуру, можно использовать следующие практические рекомендации:

- размещать вентиляторы около ограждения, в том числе и около замерзающих окон;

- установить отопительные приборы и делать разводку тепловых сетей в нижней части стенового ограждения;

- не создавать препятствий для движения воздуха около наружных стен. Например, не следует ставить у стен громоздкую мебель или пианино. Это приведет к снижению температуры поверхности стены, возникновению конденсата как стены, так и мебели. Не рекомендуется обшивать внутреннюю поверхность наружных стен различными пластмассовыми, волокнистыми и другими панелями, которые затрудняют движение воздуха около ограждения.

Передача тепла излучением к внутренней поверхности ограждения происходит от окружающих внутренних конструкций (пола, перегородок, несущих конструкций), которые имеют более высокую температуру, чем внутренняя поверхность наружной стены.

Коэффициент теплоотдачи излучением α_L определяется по формуле

$$\alpha_L = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}} \cdot \frac{\left[\frac{t_1 + 273}{100} \right]^4 - \left[\frac{t_2 + 273}{100} \right]^4}{t_1 - t_2}, \quad (23)$$

где C_1 и C_2 – коэффициенты излучения поверхностей;

C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

t_1 и t_2 – температуры поверхностей.

При определении величины t_1 и t_2 принимаются равными температурам внутреннего воздуха и внутренней поверхности ограждения соответственно.

Коэффициент излучения абсолютно черного тела C_0 равен 5,75 Вт/(м²°C⁴).

Коэффициенты излучения материалов определяются по формуле

$$C = C_0 \varepsilon,$$

где ε - степень черноты материала.

Степень черноты материалов зависит от их химических свойств и состояния поверхности (полированный, окисленный, шероховатый и т.п.). Для ряда строительных материалов степень черноты приведена в табл. 11.

При определении $\alpha_{\text{л}}$ на наружной поверхности ограждения также пользуются формулой (23). При этом принимается, что $C_2 = C_0$, t_1 равна температуре наружной поверхности ограждения, а t_2 - температуре наружного воздуха.

Таблица 11

Степень черноты ε и коэффициент поглощения солнечной радиации ρ строительных материалов

Материал	Состояние поверхности	ε	ρ
Алюминий	Полированная	0,04-0,06	0,26
	Матовая	0,055	0,38
	Окисленная	0,1	0,4-0,52
Сталь	Полированная	0,128	0,45
	Ржавая	0,69-0,9	0,74
	Оцинкованная	0,28	0,64
Медь	Полированная	0,02-0,05	0,3-0,5
	Матовая	0,2-0,3	0,4-0,65
Лаки, краски маслянистые и эмалевые	—		
	белая	0,8-0,96	0,12-0,26
	охра золотистая	0,8-0,96	0,44
	зелень изумрудная	0,8-0,96	0,61
	кобальт фиолетовый	0,8-0,96	0,83
	черная	0,8-0,96	0,98
Алюминиевая краска различной давности	—	0,27-0,67	0,35-0,4
Белая фарфоровая эмаль	—	0,897	0,25-0,35
Асбестоцементные плиты	Шероховатая	0,95	0,65
Бетон	—	0,63	0,62
Дерево	Строганное	0,77-0,89	0,59
Кирпич глиняный	Шероховатая	0,93	0,7-0,77
Гипс	—	0,98	0,05-0,1
Штукатурка известковая	—	0,91	0,7
Мрамор серый	Полированная	0,93	0,3
Гранит	—	0,42	0,8
Песчаник красный	Гладкошлифованная	0,58	0,73
Плитка метлахская	Гладкая	0,67	0,8
Стекло оконное	Гладкая	0,94	0,04

Анализ данных таблицы позволяет сделать ряд очень важных практических выводов.

1. Полированные поверхности обладают значительно меньшей степенью черноты, меньшим коэффициентом излучения C и, следовательно, более высоким сопротивлением теплоперехода R_b . Поэтому они будут иметь более низкую температуру, чем шероховатые поверхности, и вероятность возникновения конденсата на них больше.

2. Очень высокую степень черноты, близкую к степени черноты абсолютно черного тела, у которого $\varepsilon = 1$, имеют такие строительные материалы, как гипс, известковая штукатурка, асбестоцементные листы, кирпич, мрамор, оконное стекло, дерево и различные краски независимо от цвета. Температурный режим на внутренней поверхности ограждений, покрытых этими материалами, будет наиболее благоприятным. И наоборот, такие материалы, как алюминий и оцинкованная сталь, широко применяемые в настоящее время в строительстве, имеют очень низкую степень черноты и, следовательно, высокое сопротивление теплоперехода. Улучшить температурный режим на внутренней поверхности ограждений из этих материалов можно путем их окраски.

Покажем это на ПРИМЕРЕ 4.

ПРИМЕР 4. Определить температуру внутренней поверхности ограждения из трехслойных оцинкованных металлических панелей с утеплителем из пенополиуретана производственного здания с нормальным режимом.

Исходные данные: толщина утеплителя равна 50 мм, толщина обшивок составляет 0,8 мм, $t_b = +18\text{ }^\circ\text{C}$; $t_n = -50\text{ }^\circ\text{C}$, относительная влажность внутреннего воздуха 60 %, $\lambda_{yt} = 0,04\text{ Вт/(м }^\circ\text{C)}$. Скорость ветра составляет 5 м/сек.

Расчет. Степень черноты оцинкованной поверхности равен 0,28, окрашенной поверхности – 0,9. Соответственно, коэффициенты излучения оцинкованной поверхности C равен $5,75 \cdot 0,28 = 1,61$, а окрашенной – $5,75 \cdot 0,9 = 5,18\text{ Вт/(м}^2\text{ }^\circ\text{C}^4)$. Коэффициент излучения поверхностей окружающих конструкций также равен $5,18\text{ Вт/(м}^2\text{ }^\circ\text{C}^4)$.

Коэффициенты теплоотдачи излучением $\alpha_{\text{л}}$ определяем по формуле (25). При вычислениях $\alpha_{\text{л}}$ следует задать температуру внутренней поверхности наружного ограждения. Если полученная в результате расчета температура поверхности получится иной, то расчет нужно будет повторить с использованием новой температуры.

Примем для оцинкованной поверхности $\tau_b = +8\text{ }^\circ\text{C}$, а оцинкованной и окрашенной $+11\text{ }^\circ\text{C}$.

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{л}}$ будет равен:
- для оцинкованной обшивки

$$\alpha_l = \frac{1}{\frac{1}{5,18} + \frac{1}{1,61} - \frac{1}{5,75}} \cdot \frac{\left[\frac{18+273}{100}\right]^4 - \left[\frac{8+273}{100}\right]^4}{18-8} = 1,46 \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)};$$

- для оцинкованной и окрашенной обшивки:

$$\alpha_l = \frac{1}{\frac{1}{5,18} + \frac{1}{5,18} - \frac{1}{5,75}} \cdot \frac{\left[\frac{18+273}{100}\right]^4 - \left[\frac{11+273}{100}\right]^4}{18-11} = 4,29 \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)}.$$

Коэффициенты теплоотдачи конвекцией внутренней поверхности определяются по формуле (23):

- для оцинкованной обшивки

$$\alpha_k = 1,43 \sqrt[3]{18-8} = 3,09 \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)};$$

- для оцинкованной и окрашенной обшивки

$$\alpha_k = 1,43 \sqrt[3]{18-11} = 2,74 \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)}.$$

Следовательно, коэффициент тепловосприимчивости на внутренней поверхности ограждения будет равен:

- при оцинкованной обшивке

$$\alpha_{\text{в}} = \alpha_l + \alpha_k = 1,46 + 3,09 = 4,55 \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)};$$

- при оцинкованной и окрашенной обшивке

$$\alpha_{\text{в}} = 4,29 + 2,74 = 7,03 \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)}.$$

Сопротивление тепловосприимчивости, соответственно

$$R_{\text{в}} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} = \frac{1}{4,55} = 0,22 \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)};$$

$$R_{\text{в}} = \frac{1}{7,03} = 0,142 \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)}.$$

При вычислении коэффициента теплоотдачи излучением на наружной поверхности ограждения в формуле (24) примем $C_1=1,61$, $C_2=5,75 \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)}$, а температуру поверхности ограждения равной -45 °С .

$$\alpha_l = \frac{1}{\frac{1}{1,61} + \frac{1}{5,75} - \frac{1}{5,75}} \cdot \frac{\left[\frac{50+273}{100}\right]^4 - \left[\frac{45+273}{100}\right]^4}{50-45} = 1,93 \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)}.$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k вычислим по формуле (24)

$$\alpha_k = 1,16 (6,31\nu^{0,656} + 3,25e^{-1,91\nu}) = 21 \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)}.$$

Коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности

$$\alpha_n = 1,93 + 21 = 22,93 \text{ Вт/(м}^2 \text{ °С)},$$

а сопротивление теплоотдаче

$$R_{\text{н}} = \frac{1}{22,93} = 0,04 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}.$$

Таким образом, сопротивление теплопередаче ограждения будет равно:
- при оцинкованной обшивке

$$R_0 = 0,142 + \frac{0,05}{0,04} + 0,04 = 1,396 \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}.$$

Температуру внутренней поверхности ограждения, $^\circ\text{C}$, вычислим по формуле (20):

- при оцинкованной обшивке

$$\tau_{\text{в}} = 18 - \frac{18 + 50}{1,51} 0,22 = 8;$$

- при оцинкованной и окрашенной обшивке

$$\tau_{\text{в}} = 18 - \frac{18 + 50}{1,396} 0,142 = 11,1.$$

Полученные температуры близки к заданным, поэтому перерасчет не делаем.

При заданной относительной влажности 60 % температуру точки росы вычислим с использованием табл. 8

Максимальная упругость водяного пара при $t_{\text{в}}=18 \text{ } ^\circ\text{C}$ равна 2064 Па. При относительной влажности внутреннего воздуха 60 % упругость водяного пара равна $2064 \cdot 0,6=1238$ Па. Приняв эту величину за максимальную упругость водяного пара, по той же таблице находим температуру точки росы, равной $10,1 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Следовательно, на оцинкованной поверхности появится конденсат, а на окрашенной нет.

6. ТЕМПЕРАТУРА НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОГРАЖДЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

При натурных обследованиях ограждающих конструкций зданий неоднократно были замерены высокие температуры нагрева под воздействием солнечной радиации. Особенно сильно нагреваются металлические (стальные и алюминиевые) ограждения [12,13]. Так, при натурных обследованиях алюминиевых ограждающих конструкций Якутской ГРЭС, зданий ТЭЦ Байкальского целлюлозного завода и Селенгинского целлюлозно-картонного комбината при отсутствии ветра были замерены температуры наружных обшивок алюминиевых стенок панелей и панелей покрытий, равные 70 и более градусов при температуре окружающего воздуха $+20\dots+26 \text{ } ^\circ\text{C}$. Поверхности конструкций из других материалов также нагреваются, но в меньшей степени (табл. 12). Нагрев наружных поверхностей ограждений в летний период и низкие температуры в зимний период приводят к значительным годовым температурным перепадам, достигающим 100 и более градусов. В результате таких температурных перепадов в ограждающих конструкциях возникают напряжения и деформации, которые сопоставимы, а в ряде случаев превышают напряжения и деформации от внешних воздействий (ветра, снега).

Таблица 12

**Величины нагрева наружных поверхностей ограждений
из различных материалов**

Вид ограждения или материала	Температура поверхности, °С	Температура воздуха в тени, °С	Время замера, ч.-мин.
Здание Якутской ГРЭС. Стеновое ограждение Южная сторона (21.07.70)			
Алюминиевая поверхность окисленная	71*	26	9-31
То же	71*	26	9-36
То же	63	26	10-26
Здание Якутской ГРЭС. Южная сторона (21.07.70)			
Алюминиевая поверхность окисленная	60	27	9-59
Деревянная доска	44	27	9-56
Монолитный бетон	36	27	9-57
Поверхность алюминиевого ограждения, покрытая тон- ким слоем раствора	50	27	10-01
Стекло оконное	36	27	10-03
Деревянный оконный пере- плет	43	27	10-05
Сталь листовая неокрашен- ная темная	58	27	10-07
Оцинкованная сталь	55	27	10-10
Кладка из красного кирпича	45	27	10-13
Рубероид, покрытый слюдой	50,5	27	11-11
Пергамин	49	27	11-12
Асбестоцементный плоский лист	47	27	11-14
Луженая сталь	43	27	11-15
Стальные детали крепления панелей, покрытые ржавчи- ной	56	27	11-21
Поверхность алюминиевого стенowego ограждения	60,5	27	11-18
Кровля здания ТЭЦ Селенгинского целлюлозно-картонного комбината			
Алюминиевая поверхность, окисленная и покрытая ца- рапинами	70*	20,5	15-10
То же	71*	20,5	15-12

*Замеры проведены при отсутствии ветра и ясном небе. Остальные замеры проведены при незначительном ветре.

В панельных ограждениях расстраиваются стыки, срывает нащельники и нарушается их герметичность.

Большой нагрев под действием солнечной радиации необходимо также учитывать при выборе материалов для ограждения и их стыков. Некоторые полимерные материалы при столь высоких температурах меняют свои физико-механические свойства. Так, например, мастика УМС-50, которая широко применяется в строительстве, при таких температурах приобретает текучесть. Полистирольные пенопласты не рекомендуются применять при температуре выше 70 °С, а поливинилхлоридные – при температуре выше 60 °С. Изменяются и свойства клеев. Каучуковый клей 88-Н, часто применяемый в металлических панелях, снижает свою прочность при температуре 60 °С на 70-80 %.

Все отмеченные обстоятельства свидетельствуют о том, что при расчете и конструировании ограждающих конструкций чрезвычайно важно знать максимальную температуру наружных поверхностей, которая возникает в результате воздействий солнечной радиации.

Для получения метода расчета температуры наружных поверхностей необходимо воспользоваться уравнением теплового баланса ограждения. Учитывая, что нагрев осуществляется достаточно быстро, температурный режим ограждения можно считать стационарным.

В этом случае

$$Q_{\text{л}} = Q_{\text{из}} + Q_{\text{к}} + Q_{\text{п}}, \quad (24)$$

где $Q_{\text{л}}$ – тепловой поток, поглощаемый ограждением при воздействии солнечной радиации, Вт;

$Q_{\text{из}}$ – тепловой поток, отдаваемый наружной поверхностью ограждения окружающему воздуху излучением, Вт;

$Q_{\text{к}}$ – тепловой поток, отдаваемый наружной поверхностью ограждения окружающему воздуху конвекцией, Вт;

$Q_{\text{п}}$ – тепловой поток, отдаваемый ограждением внутреннему воздуху, Вт.

Компоненты формулы (24) соответственно равны

$$\begin{aligned} Q_{\text{л}} &= p \cdot S \cdot k \cdot dF, \\ Q_{\text{из}} &= C_{\text{н}} \left[\left(\frac{T_{\text{x}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{н}}}{100} \right)^4 \right] dF, \\ Q_{\text{к}} &= \alpha_{\text{к}} (T_{\text{x}} - T_{\text{н}}) dF, \\ Q_{\text{п}} &= k^1 (T_{\text{x}} - T_{\text{н}}) dF, \end{aligned}$$

где p – коэффициент поглощения солнечной радиации, который зависит от материала поверхности (см. табл. 11);

S – суммарная интенсивность прямой и рассеянной радиации в Вт/м² и принимается по СНиП [7];

k – коэффициент, учитывающий прозрачность атмосферы и равный для больших городов и промышленных центров 0,7, для горных и отдаленных районов – 0,8;

C_n – коэффициент излучения наружной поверхности ограждения, Вт/(м² °C);

$T_x = \tau_n + 273$ – абсолютная температура наружной поверхности ограждения, °C;

$T_n = t_n + 273$ – абсолютная температура наружного воздуха, °C;

$T_b = t_b + 273$ – абсолютная температура внутреннего воздуха, °C;

τ_n и t_n – температура наружной поверхности ограждения и наружного воздуха, °C, соответственно;

α_k – коэффициент передачи тепла конвекцией на наружной поверхности, Вт/(м² °C);

k^I – коэффициент передачи тепла поверхности ограждения внутреннему воздуху, Вт/(м² °C);

Для наружных поверхностей величина α_k определяется по формуле (22).

С увеличением скорости ветра, обдувающего наружную поверхность ограждения, α_k возрастает, и количество тепла, отдаваемого конвекцией, растет. Поэтому наиболее сильный нагрев наружной поверхности ограждения будет наблюдаться в безветренную погоду.

При $v=0$ $\alpha_k = 3,77$ Вт/(м² °C)

$$k^I = \frac{1}{R + R_b}, \quad (25)$$

где R – термическое сопротивление стены, (м² °C)/Вт;

R_b – сопротивление теплоотдачи внутренней поверхности ограждения, (м² °C)/Вт;

Термическое сопротивление ограждения определяется как сумма термических сопротивлений всех слоев ограждения, включая и невентилируемые воздушные прослойки.

Величины сопротивлений теплоотдачи R_b металлических внутренних поверхностей в строительных нормах отсутствуют, поэтому были проведены соответствующие расчеты. Расчеты показали, что для неокрашенных алюминиевых или стальных оцинкованных поверхностей значение R_b в 2-2,5 раза выше, чем для традиционных строительных материалов или поверхностей, покрытых клеевыми или масляными красками, и равно для алюминиевых поверхностей 0,27, для окисленных 0,24, а для оцинкованных 0,20 (м² °C)/Вт. Основной причиной более высоких значений сопротивления теплоотдачи металлических поверхностей является их малый коэффициент излучения.

В значительной мере нагрев поверхностей зависит от **коэффициента поглощения солнечной радиации** ρ (см. табл. 11). Коэффициент поглощения ρ алюминия, в зависимости от состояния поверхности, колеблется

в пределах от 0,26 до 0,52 и примерно в 1,5-2 раза меньше коэффициента поглощения оцинкованного железа. Но есть материалы, коэффициенты поглощения которых ниже, чем у алюминия: например, лаки и краски белых цветов, гипс, оконное стекло, белая фарфоровая эмаль. Поэтому, если алюминиевое или стальное ограждение окрасить масляными или синтетическими красками в светлые тона или покрыть фарфоровой эмалью, то нагрев может быть снижен. Не в меньшей степени зависит нагрев поверхностей и от того, как интенсивно они отдают тепло окружающему воздуху.

В безветренную погоду передача тепла в основном осуществляется излучением, и чем больше коэффициент излучения поверхности C_n , тем меньше нагрев.

Степень черноты материала ε и, следовательно, коэффициент излучения C_n зависят от физических свойств материала, состояния его поверхности, температуры и пористости.

Полированные поверхности имеют значительно меньший коэффициент излучения, чем шероховатые поверхности одного и того же материала. С повышением температуры коэффициент излучения возрастает. Однако установлено, что в пределах температур от 20 до 100 °С коэффициент излучения материалов меняется незначительно и поэтому он может быть принят равным постоянной величине. С увеличением пористости коэффициент излучения увеличивается.

Из табл. 11 следует, что степень черноты и, следовательно, коэффициент излучения алюминиевых сплавов и оцинкованной стали существенно (в 3...20 раз) ниже, чем у традиционных строительных материалов. Это значит, что алюминиевые листы чрезвычайно плохо излучают тепловую энергию при воздействии солнечной радиации, и этим, в частности, объясняется высокая температура нагрева алюминиевых обшивок, замеренная при натурных обследованиях.

Из табл. 11 следует также, что степень черноты лаков и красок сравнительно высока и практически не зависит от их цвета. Поэтому, окрасив алюминиевые и оцинкованные поверхности красками светлых тонов, можно не только снизить их поглощательную способность, но и резко (в 4...20 раз) увеличить количество тепла, отдаваемого излучением, и этим самым уменьшить нагрев от солнечной радиации.

В судостроительной промышленности это свойство красок светлых тонов используется достаточно широко. Нагрев палуб кораблей в южных широтах достигает 80 °С, поэтому их окрашивают эмалью АК-17 (3 слоя) по грунту АГ-100 (2 слоя). Хорошими теплозащитными свойствами обладают и эмали ХС-510, ХСЗ-1 и АС-599.

Подставим значения $Q_{\text{л}}$, $Q_{\text{из}}$, $Q_{\text{к}}$, $Q_{\text{п}}$ в уравнение (23), сократив dF и проделав соответствующие преобразования, получим:

$$\left(\frac{T_x}{100}\right) + \frac{(\alpha_k + k^1)100}{\varepsilon C_0} \frac{T_x}{100} - \left[\left(\frac{T_n}{100}\right) + \frac{\alpha_k T_n}{\varepsilon C_0} + \frac{k^1 T_B}{\varepsilon C_0} + \frac{\rho S k}{\varepsilon C_0}\right] = 0.$$

Это уравнение может быть записано в следующем виде

$$x^4 + \alpha x - \varepsilon = 0, \quad (26)$$

где

$$x = \frac{T_x}{100}; \quad \alpha = \frac{(\alpha_k + k^1)100}{\varepsilon C_0}; \quad \varepsilon = \left(\frac{T_n}{100}\right)^4 + \frac{\alpha_k T_n}{\varepsilon C_0} + \frac{k^1 T_B}{\varepsilon C_0} + \frac{\rho S k}{\varepsilon C_0}.$$

Уравнение (26) наиболее просто решается с применением номограммы.

По горизонтальной оси в этой номограмме откладывается значение θ и проводится вертикаль до пересечения с соответствующей кривой, характеризующей α . Ординаты точки пересечения и есть температура нагрева. Для простоты пользования на номограмме приведены не абсолютные температуры, деленные на сто, а температуры в $^{\circ}\text{C}$.

ПРИМЕР 5. Определить температуру наружной поверхности стенового ограждения Якутской ГРЭС из алюминиевых панелей при воздействии солнечной радиации.

Исходные данные. География: широта 62° , южная сторона здания. Обшивки панелей окислены, $\varepsilon=0,1$; $\rho=0,45$, $S=540+104=644 \text{ Вт/м}^2$, $\kappa=0,8$, $C_0=5,75 \text{ Вт/м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Ветра нет, $\alpha_k=3,77 \text{ Вт/(м }^{\circ}\text{C)}$. Температура воздуха в здании 20°C . Толщина панелей $0,1 \text{ м}$, утеплитель из минераловатной плиты $\lambda=0,058 \text{ Вт/(м}^{\circ}\text{C)}$.

Расчет. Находим значение

$$k^1 = \frac{1}{R + R_B} = \frac{1}{\frac{0,1}{0,058} + 0,24} = 0,515 \text{ Вт/(м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C)}.$$

Подставив необходимые величины в формулы (38) и (39), находим значение параметров $\alpha=740$ и $\theta=2700$.

Пользуясь номограммой, определяем температуру наружной поверхности стеновых панелей, равную 72°C . Во время натуральных обследований (см. табл. 18) в безветренную погоду была замерена температура, которая составила 71°C .

7. ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТЬ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Следует отметить, что постоянство температур наружного и внутреннего воздуха и, следовательно, температурного режима ограждения, которое принималось в предыдущих расчетах, в реальных условиях встречается редко. Колебания температуры наружного воздуха и, следовательно, наружной поверхности, сказывается на величине теплового потока, проходящего через ограждение (см. формулу (2)), и температуре внутренней

поверхности ограждения и внутреннего воздуха. Амплитуда колебаний температуры на внутренней поверхности ограждения будет существенно меньше амплитуды колебаний на наружной поверхности (рис. 3).

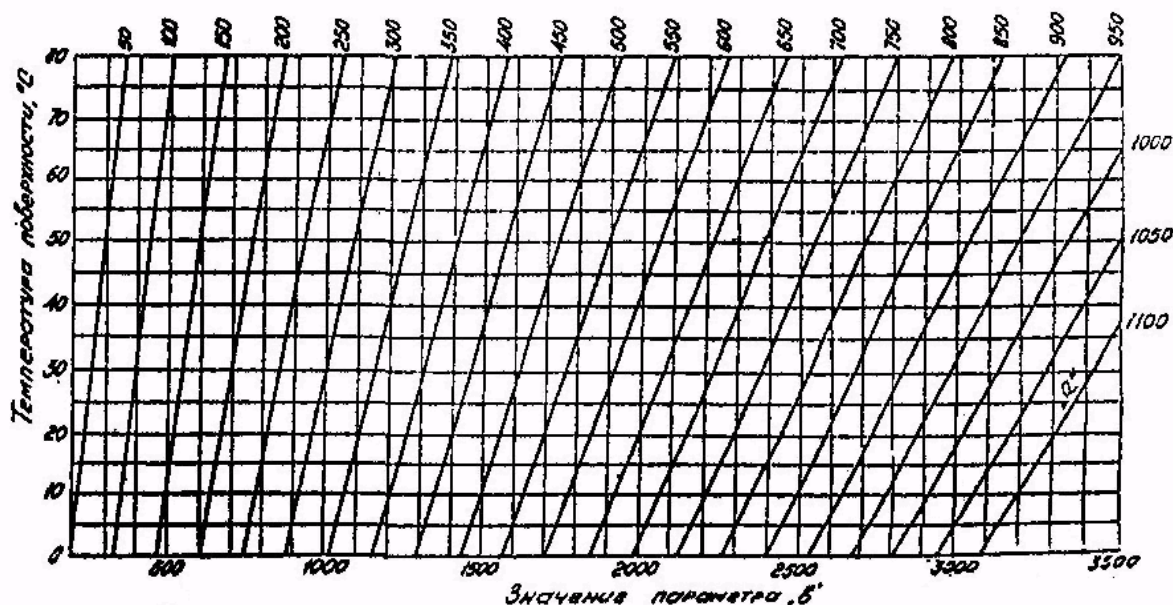


Рис. 3. Амплитуда колебаний температуры.

Степень затухания колебаний температуры может быть оценена **коэффициентом затухания**

$$\nu = \frac{A\tau_n}{A\tau_b},$$

где $A\tau_n$ и $A\tau_b$ — амплитуды колебаний температуры наружной и внутренней поверхности ограждения, соответственно.

Как следует из рис. 3, наиболее быстро затухают амплитуды колебаний температур в наружном слое ограждения. Слой толщиной δ , в котором амплитуда колебаний температур уменьшается в два раза, называется **слоем резких температурных колебаний**.

Интенсивность затухания амплитуды температурных колебаний зависит от тепломеханических свойств, удельной теплоемкости и плотности γ материалов, из которых выполнено ограждение, и характеризуется безразмерной величиной, которая называется **тепловой инерцией ограждения D** . Эта величина вычисляется по формуле

$$D = R_1 S_1 + R_2 S_2 + \dots + R_n S_n,$$

где R_1, R_2, \dots, R_n — термические сопротивления отдельных слоев ограждающей конструкции, Вт/(м²°С), которые принимаются по прил. 3 СНиП [8].

Величина тепловой инерции используется для оценки **теплоустойчивости ограждения**, которая характеризует способность ограждения сохранять относительно постоянной температуру внутренней поверхности при колебаниях теплового потока.

Легкие ограждающие конструкции, например, металлические, с применением современных эффективных утеплителей, значительно менее теплоустойчивы, чем кирпичные или другие массивные конструкции.

Постоянство температуры на внутренней поверхности ограждения является одним из условий комфортности помещения. Поэтому в районах с резкими суточными перепадами температуры наружного воздуха, а также при периодически действующих системах отопления (например, печное отопление), ограждающие конструкции должны иметь не только требуемое сопротивление теплопередаче, но и высокую теплоустойчивость.

При постоянно действующей системе центрального отопления, и, тем более, если в системе автоматически регулируется подача тепла в зависимости от температуры наружного воздуха, надобность в расчете теплоустойчивости ограждения отпадает.

Проверка ограждения на теплоустойчивость необходима для жаркого периода года, когда под воздействием высокой температуры окружающего воздуха и дополнительного интенсивного нагрева под воздействием солнечной радиации возможен сильный нагрев внутренней поверхности ограждения и создание дискомфорта в помещении. СНиП II-3-79^{**}. Строительная теплотехника предусматривает такую проверку при строительстве жилых зданий, больничных учреждений, диспансеров, родильных домов, интернатов, детских садов, яслей, домов престарелых и инвалидов, а также производственных зданий, в которых необходимо соблюдать оптимальную температуру воздуха по условиям технологии в районах со среднемесячной температурой июля 21 °С и выше при условии, что тепловая инерция D стен менее 4, покрытий – менее 5.

Суть проверки сводится к тому, чтобы амплитуда колебаний температуры внутренней поверхности была меньше требуемой, т.е.

$$A \tau_B \leq A \tau_B^{TP}. \quad (27)$$

$$A_{\tau B} \frac{A t_n^{расч}}{\nu}, \quad (28)$$

$$\Delta \tau_B^{TP} = 2,5 - 0,1(t_n - 21), \quad (29)$$

где t_n – среднемесячная температура наружного воздуха за июль, °С, принимается по СНиП 2.01.01. – 82 [7];

$A_{тн}^{расч}$ – расчетная амплитуда колебаний температуры наружного воздуха, определяется по СНиП II-3 -79^{**};

ν – величина затухания расчетной амплитуды колебаний температуры наружного воздуха, определяемая по СНиП II-3 -79^{**}.

Чтобы исключить сильный нагрев помещений от солнечной радиации через окна и фонари зданий, в районах со среднемесячной температурой июля 21 °С и выше следует предусматривать солнцезащитные устройства. *Коэффициент теплопропускания солнцезащитных устройств* $\beta_{\text{сз}}$ должен быть не более нормативной величины, установленной СНиП II-3-79**. Коэффициенты теплопропускания солнцезащитных устройств различной конструкции приведены там же.

8. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОКОН, ФОНАРЕЙ, ДВЕРЕЙ И ВОРОТ

Теплотехнические свойства окон и фонарей в 5...10 раз (в зависимости от конструкции и района строительства) ниже теплотехнических свойств стен, чердачных перекрытий и покрытий. Поэтому, учитывая необходимость экономии энергетических ресурсов, площадь окон и фонарей должна быть минимально необходимой, исходя из условий обеспечения естественной освещенности. Размеры окон и фонарей, а также их расположения определяется в соответствии со СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение. Фактические размеры световых проемов должны отличаться от расчетных не более чем на 10 %.

Приведенное сопротивление теплопередаче окон, остекления балконных дверей и фонарей должно обеспечивать экономию энергетических ресурсов. Следовательно, оно должно быть меньше, указанного в табл. 9. Приведенное сопротивление глухой части балконных дверей принимаются в 1,5 раза больше, чем остекления. Фактические приведенные сопротивления окон, балконных дверей и фонарей различной конструкции приведены в справочном прил. 3. В целях экономии энергетических ресурсов в жилых и общественных зданиях рекомендуется площадь окон с приведенным сопротивлением теплопередаче меньшей 0,56 м² °С/Вт принимать не больше 18 % от площади ограждающих конструкций стен вместе с окнами.

В последние годы широкое применение в практике строительства находят окна с пластмассовыми переплетами и коробками, изготовленными из зарубежных профилей, которые усилены металлическими профилями. Наилучшими теплотехническими свойствами обладают профили с тремя и более воздушными камерами. В справочном прил. 3 приведены сведения по окнам именно из этих профилей.

Анализ табл. 9 и прил. 3 показывает, что при возникновении жилых зданий, а также общественных зданий типа больниц, стационаров, детских школ и яслей, следует применять в средней полосе России (ГСОП = 4 000...5 000 °С · сут.) деревянные или пластмассовые окна с двухкамерным стеклопакетом или пластмассовые окна с двухкамерным стеклопакетом в отдельных переплетах. В районах Среднего Урала (ГСОП = 6 000 °С сут.) при такой же конструкции окон требуется применять стекла с селективными покрытиями или с заполнением стеклопакетов аргоном.

Принимая во внимание низкие теплотехнические свойства окон по сравнению с другими ограждающими конструкциями здания, на их внутренней поверхности допускается выпадение конденсата при расчетной температуре наружного воздуха, но во всех зданиях, кроме производственных, не допускается уменьшение температуры внутренней поверхности конструктивных элементов ниже 3 °С.

В жилых и многих общественных зданиях площадь окон составляет до 50 % площади наружных стен. В этом случае окна являются основным источником теплопотерь здания. Поэтому теплотехнические свойства окон будут повышаться и после принятия изменения №4 к СНиП [8].

Основными путями увеличения теплотехнических свойств окон являются:

- увеличение количества воздушных герметичных прослоек между стеклами;
- использование стекол со специальными теплоотражающими покрытиями;
- заполнение стеклопакетов инертным газом;
- увеличение количества воздушных камер в пластмассовых переплетах до четырех и более (немецкая фирма RENAУ уже создала новую систему оконных профилей «S730 4+» с четырьмя воздушными камерами);
- использование отдельных переплетов.

Исследования, выполненные на кафедре архитектуры Уральского государственного технического университета, показали, что применение стекол с мягким селективным покрытием, по сравнению с обычными стеклами, повышает теплотехнические свойства стеклопакетов на 35 %, а заполнение аргонном – на 15-20 %.

Увеличение количества камер в пластмассовых профилях переплетов и коробок с 3 до 4 увеличивает их теплотехнические свойства на 20 %.

Требуемое сопротивление теплопередаче R_0^{TP} наружных дверей и ворот должно быть не менее $0,6 R_0^{TP}$ стен зданий, определяемого по формуле (10). В целях максимального снижения массы дверей и ворот в конструкции следует широко применять современные эффективные (полимерные и минераловатные) утеплители. Наиболее рациональными в теплотехническом отношении и по массе в производственных зданиях являются двери и окна, изготовленные из трехслойных панелей с металлическими обшивками и средним слоем из пенополиуретана.

Такая же конструкция входных дверей может быть использована в жилищном строительстве. Металлические обшивки могут быть профилированы или иметь выштамповки в форме деревянных филенчатых дверей. После окраски они не будут внешне отличаться от традиционных деревянных дверей, но будут более прочными и надежными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП П-3-79**. Строительная теплотехника / Минстрой России. - М.: ГЦ ЦПП, 1996. 29 с.: ил.
2. Руководство по теплотехническому расчету и проектированию ограждающих конструкций зданий / НИИСФ. М.: Стройиздат, 1995. 141с.: ил.
3. Табунщиков, Ю.А., Хромец, Д.Ю., Матросов, Ю.А. Тепловая защита ограждающих конструкций зданий и сооружений. М.: Стройиздат, 1986. 380 с.: ил.
4. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика (теплотехнические основы отопления, вентиляция и кондиционирования воздуха): учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 1970. 376 с.: ил.
5. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: Стройиздат, 1973. 287с.: ил.
6. Роджерс, Т.С. Проектирование теплозащиты зданий. М.: Стройиздат, 1966. 228 с.: ил.
7. СНиП 23-01-99. Строительная климатология / Госстрой России. М.: 2000.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архитектура гражданских и промышленных зданий. Гражданские здания [Текст]: учеб. для вузов / А.В. Захаров, Т.Г. Маклакова, А.С. Ильяшев и др.; под общ. ред. А.Б. Захарова. М.: Стройиздат, 1993. 500 с.: ил.
2. ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [Текст]. М.: Изд-во стандартов, 1988. 13с.
3. Ильинский, В.М. Строительная теплофизика [Текст] / В.М. Ильинский. М.: Высшая школа, 1974. 319с.: ил.
4. Мейер-Бое, В. Строительные конструкции зданий и сооружений [Текст] / пер. с нем. Ю.М. Потапова; под ред. Казбек-Казиева. М.: Стройиздат, 1993. 408 с.: ил.
5. Тамплон, Ф.Ф. Влияние ребер и теплоизолирующих прокладок на температурный режим металлических ограждений [Текст] / Ф.Ф. Тамплон, Б.И. Суханов. Свердловск. Информационный листок №214-90. Свердловский межотраслевой ЦНТИ, 1990. 4 с.: ил.
6. Тамплон, Ф.Ф. Нагрев металлических ограждающих конструкций под воздействием солнечной радиации [Текст] / Ф.Ф. Тамплон. // Промышленное строительство. 1974 № 6. с. 38-41.
7. Тамплон, Ф.Ф. Ограждающие конструкции из алюминиевых панелей [Текст] / Ф.Ф. Тамплон. Л.: Стройиздат. Ленингр. отделение, 1976. 96 с.: ил.
8. Ушков, Ф.В. Теплопередача ограждающих конструкций при фильтрации воздуха [Текст] / Ф.В. Ушаков. М.: Стройиздат, 1969.